

孙秀博,李清泉,魏敏. 1960—2009年中国年降水量的年际及年代际变化特征[J]. 气象, 2012, 38(12): 1464-1472.

1960—2009年中国年降水量的年际 及年代际变化特征^{*}

孙秀博^{1,2} 李清泉² 魏敏³

1 中国气象科学研究院, 北京 100081

2 国家气候中心, 中国气象局气候研究开放实验室, 北京 100081

3 国家气象信息中心, 北京 100081

提 要: 利用 1960—2009 年中国台站降水量资料, 揭示了全国、区域年降水量变化的多时间尺度的复杂结构和地区性差异, 并根据年代际周期对未来降水量变化的贡献进行了预估。我国北方年降水量年际变化较强, 年际变化对降水量的贡献较大; 南方年降水量年际变化相对较弱, 年际变化对降水量的贡献较小, 东北和西北地区年降水量的年代际变化较强, 年代际变化明显, 且同位相; 其他地区年降水量年代际变化相对较弱。我国东北、西北、华南、青藏高原、西南地区年降水量的年代际变率对降水量的贡献目前处于下降阶段, 未来 5~10 年年代际变化的贡献可能继续呈下降趋势; 长江中下游地区降水量的年代际变率对降水量的贡献目前处于上升阶段, 未来 5~10 年年代际变化的贡献可能继续呈上升趋势。

关键词: Morlet 小波, 年降水量, 年际变化, 年代际变化

Analysis on Interannual and Interdecadal Variability of Annual Rainfall over China During 1960—2009

SUN Xiubo^{1,2} LI Qingquan² WEI Min³

1 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 Open Laboratory for Climate Studies of China Meteorological Administration,
National Climate Centre, Beijing 100081

3 National Meteorological Information Centre, Beijing 100081

Abstract: Based on the rainfall data from meteorological observation stations in China from 1960 to 2009, the multi-time scale complex construction and notably regional differences of annual precipitation variability have been revealed and the precipitation changes in the future also projected according to the interdecadal period. The fluctuant energy of annual precipitation in the northern part of China is larger, and so is the contribution of interannual variation. However, the reality in the southern part of China is reverse. Unlike other regions, the interdecadal variabilities of annual precipitation in the Northeast China and Northwest China are remarkable and in the same phase. At present, the contribution of interdecadal variabilities to the annual precipitation in Northeast China, Northwest China, South China, Tibetan Plateau, and Southwest is in decreasing phase, and tends to keep on going down in the future 5—10 years. However it is in the ascendant phase and tends to keep on rising in the future 5—10 years in the middle and lower reaches of the Yangtze River.

^{*} 国家重点基础研究发展计划 (2012CB955203)、国家高技术研究发展计划 (2010AA012403 和 2010AA012404)、公益性行业 (气象) 科研专项 (GYHY201106022) 和国家自然科学基金 (41175065) 共同资助

2012 年 1 月 29 日收稿; 2012 年 4 月 3 日收修定稿

第一作者: 孙秀博, 主要从事气候和气候变化研究. Email: sunxiubo1986@126.com

通讯作者: 李清泉, 主要从事气候和气候变化研究. Email: liqq@cma.gov.cn

Key words: Morlet wavelet analysis, annual precipitation, interannual variability, interdecadal variability

引 言

年际和年代际变率是气候系统中两类不同时间尺度的气候变率,全球气候系统中已分别被检测出这两类气候变率的强信号。例如,热带太平洋海气系统典型的年际尺度强信号 ENSO、太平洋年代际振荡 PDO、20 世纪 60—70 年代全球气候的异常突变^[1-2]。气候的年际和年代际变率已成为气候变化信号检测和气候可预报性研究的核心内容^[3]。亚洲季风系统是全球大气环流系统的重要成员之一,亚洲季风环流在时间尺度上呈现出显著的季节内、季节、年际和年代际变化特征^[4-7]。受东亚季风环流多时间尺度变化的影响,中国天气气候的变化也存在多时间尺度的特征^[8-10]。已有的研究表明^[11-15],我国东部地区降水量年代际变化在 20 世纪 50 和 90 年代比较显著,60 年代的变化不够显著;50 年代到 60 年代中期华北降水量相对较丰沛,60 年代中期以后特别是 80 年代以来华北降水量处于相对偏少阶段;长江流域夏季降水量在 80—90 年代明显增加;80 年代末以来,中国西北地区降水量处于年代际降水量变化的相对偏多期;青藏高原区域在 60 年代上半叶积雪增量处于负位相,60 年代下半叶至 90 年代后期为多雪的正位相,1999—2007 年度又为少雪的负位相。最近,申乐琳等^[16]对中国夏季降水量的研究表明,总体来说我国降水量呈减少趋势,东部降水量普遍减少,体现出了夏季风的减弱;而西部降水量增长趋势明显,但西南一些地区有减少趋势。

虽然对我国降水量的研究已有不少,但以往的研究大多侧重于中国东部或夏季降水量的研究^[10-13,16-20],对全国平均及各区域的年降水量研究相对较少,并且根据作者所查资料,尚无人利用小波变换对中国及各区域年降水量进行全面的、多时间尺度的研究,关于年际变率和年代际变率对年降水量相对贡献的研究也较少,需要进一步加深认识和了解。为此,本文基于我国 1960—2009 年降水量资料,针对中国及各区域的年降水量的年际及以上周期变化进行了细致的分析,首先进行趋势分析和检验,然后采用 Morlet 小波变换方法,进行降水量时间序列变化特征和多时间尺度的复杂结构分析研究。本工作将有助于了解我国及各区年降水量的多

时间尺度的复杂结构变化规律,为气候变化和气候诊断预测提供科学参考依据,因此具有重要的科学意义和实用价值。

1 资料和方法

本文利用中国气象局国家气象信息中心提供的 1951—2009 年中国 756 个站的逐日降水量资料,选取 1960—2009 年无缺测的 541 个站点,计算了各站年降水量距平百分率,其中气候场取 1971—2000 年平均值。采用九点平滑滤波、小波分析和相关分析等方法系统地分析了近 50 年我国年降水量的年际以上周期变化特征。

本文利用 Morlet 小波分析方法^[21],对降水量资料进行了小波分析。小波分析方法是一种信号时频局部分析的新方法,其特点是通过时频变化突出信号在某些方面的特征,具有时频多分辨功能^[22]。由于气象要素的周期变换很复杂,变化周期不固定,且在同一时段中又包含各种时间尺度的周期变化,表现出多时间尺度的特征。因此利用小波分析方法的伸缩和平移等运算功能对函数或信号序列进行多尺度细化分析,研究不同尺度(周期)随时间的演变情况,成为研究气象要素长期变化的十分重要的工具,为开展气候异常诊断分析开辟一条崭新的途径^[23-24]。

根据 Christopher 等^[21]的研究工作,定义小波系数的模部平方为小波变换功率谱,而时间尺度 s_1 和 s_2 之间的小波功率谱之和为波动能量,用来检查某一时间尺度范围(或某一波段)的振荡能量变化,即

$$E(b) = \int_{s_1}^{s_2} |W_f(a, b)|^2 da \quad (1)$$

式中, $W_f(a, b)$ 为随参数 a 和 b 变化的函数, a 为尺度因子或频率因子,反映小波的周期长度, b 为时间因子,反映在时间上的平移。

根据 IPCC 第五次评估的定义^[25],本文把“年代”时间尺度定义为 10~30 年,10 年以下的周期性变化为年际变化。因此,年际变化(1~9 年)的能量谱计算,即式(1)中 $s_1 = 1, s_2 = 9$;年代际变化(10~30 年)的能量谱计算,即式(1)中 $s_1 = 10, s_2 = 30$ 。

为了详细研究中国不同地区的气候变化特征,

本文参考王遵娅等^[26]的方法把中国大致分为7区(见图1),即东北(1区)、华北(2区)、长江中下游(3区)、华南(4区)、青藏高原(5区)、西南(6区)和西北(7区)。此外,以35°N为界,将中国分为南、北两部分,南部包括3、4、5、6区,北部包括1、2、7区。同时,用1、2、3、4区代表中国东部,5、6、7代表中国西部。



图1 中国分区示意图

Fig. 1 Schematic diagram of climatological sub-regions in China

2 降水量序列的基本特征

1960—2009年期间,我国年降水量距平百分率变化趋势不明显;其中1964、1973和1998年降水量显著偏多(比常年偏多10%以上),1965和1986年降水量显著偏少(比常年偏少10%左右)。在这50年里我国年降水量经历2次少雨期(20世纪60—80年代,21世纪初)、1次多雨期(20世纪90年代);目前我国处于年降水量偏少阶段(见图2a)。

东北地区的年降水量呈下降趋势但不显著;其中1998年显著偏多(比常年偏多30%以上),2001和2007年显著偏少(比常年偏少20%以上)。马柱国等^[28]对东北地区1951—2006年降水量研究也表明存在线性减小的趋势。由图2b可见,近50年,东北地区年降水量有2次少雨期(20世纪60年代中期至80年代初期,20世纪90年代末期至21世纪初)、1次多雨期(20世纪80年代中期至90年代中期);目前东北处于年降水量偏少阶段。

华北地区的年降水量呈明显的下降趋势(超过 $\alpha=0.1$ 的显著性水平检验);其中1961、1964和1973年显著偏多(比常年偏多20%以上),1965、1997和1999年显著偏少(比常年偏少20%以上)。近50年,华北地区年降水量经历2次少雨期(20世

纪80代前期至中期,20世纪90年代后期至21世纪初)、2次多雨期(20世纪60—70年代,20世纪80年代后期至90年代中期),华北目前处于年降水量偏少阶段(见图2c)。徐桂玉等^[19]指出华北降水量偏少的年份大部分出现在年代际降水量偏少的阶段。我们将在后文进行详细的讨论。

长江中下游地区是我国降水量相对集中的地区,年降水量变化呈现增加的趋势,但不显著;其中1983年显著偏多(比常年偏多20%以上),1966和1978年显著偏少(比常年偏少20%以上)。近50年,长江中下游地区年降水量在1982年以前(1960—1982年)以偏少为主,1983年以后(1983—2002年)以偏多为主,目前处于年降水量偏少阶段(见图2d)。张庆云等^[12]指出20世纪60—70年代长江流域降水量处于年代际变化的少雨阶段,20世纪80年代以来,长江流域降水量处于年代际变化的多雨阶段。王绍武等^[27]分析了19世纪80年代到20世纪90年代中国东部每10年平均年降水量距平百分率的变化,指出长江中下游地区20世纪80年代以来的这个多雨时段维持时间最长。

华南地区年降水量有上升趋势,但不显著;其中1974和1997年显著偏多(比常年偏多20%左右),1963和2003年显著偏少(比常年偏少20%以上)。近50年,华南地区年降水量有3次少雨期(20世纪60年代、80年代、21世纪初)、2次多雨期(20世纪70年代、90年代),目前处于年降水量偏少阶段(见图2e)。

青藏高原地区年降水量略有上升趋势,但不显著;其中1963和1998年显著偏多(比常年偏多20%以上),1994年显著偏少(比常年偏少20%以上)。近50年,高原地区年降水量有2次少雨期(20世纪60年代后期至80年代中期,20世纪90年代前期至中期)、2次多雨期(20世纪80年代后期,20世纪90年代后期至21世纪初),目前处于年降水量偏多阶段(见图2f)。

西南地区年降水量略呈下降趋势,但不显著;其中1968年显著偏多(比常年偏多10%以上),2006和2009年显著偏少(比常年偏少10%以上)。近50年,西南地区年降水量经历了2次少雨期(20世纪80年代中期至90年代前期,21世纪初年代中期至后期)、2次多雨期(20世纪60年代至80年代初,20世纪90年代中期至21世纪初前期),目前处于年降水量偏少阶段(见图2g)。马柱国等^[28]的研究表明

西南地区的降水量和地表湿润指数呈线性减小趋势,该地区干旱化明显。

西北地区年降水量上升趋势明显(超过 $\alpha=0.1$ 的显著性水平检验);其中 1987、1988、1992、1998、2002、2003、2005 和 2007 年显著偏多(比常年偏多 20% 以上),1961、1962、1965、1968、1978、1980、1985 和 1997 年显著偏少(比常年偏少 20% 以上)。近 50 年,西北地区年降水量经历了由少雨期(20 世纪 60

年代至 80 年代前期)向多雨期(20 世纪 80 年代后期至 21 世纪初)的转变,其中 1984—1988 年为过渡期,目前处于年降水量偏多阶段(见图 2h)。同样的,李栋梁等^[14] 基于西北地区 1961—2000 年常规气象观测站资料分析揭示了西北地区气候由暖干转向暖湿的事实。

总体来说,中国各区年降水量变化特征的差异很大。在我国东部,北方(东北、华北)年降水量呈减

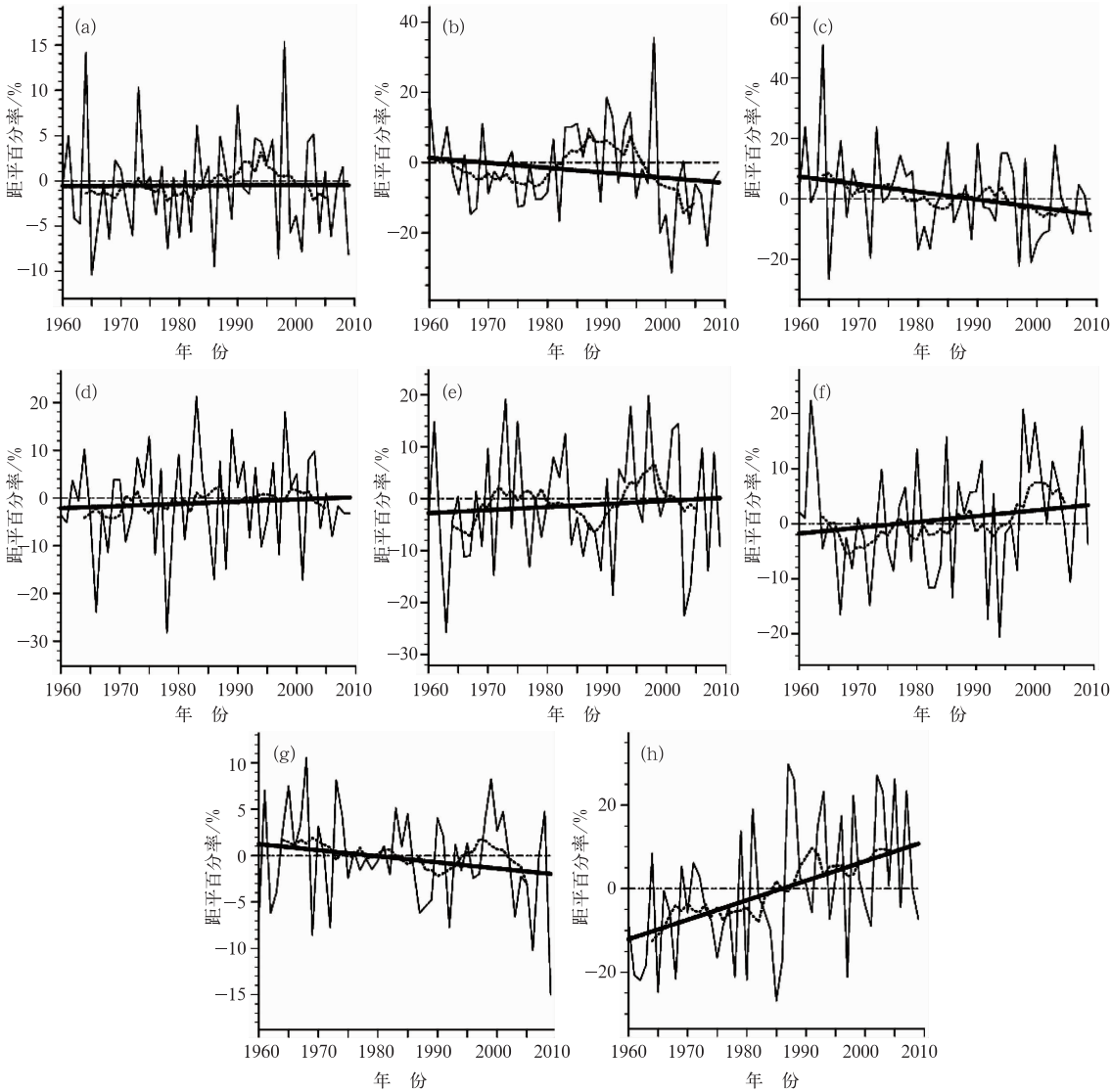


图 2 年降水量距平百分率随时间变化

(a) 全国, (b) 东北, (c) 华北, (d) 长江中下游, (e) 华南, (f) 青藏高原, (g) 西南, (h) 西北
(细实线为年降水量距平百分率, 点线为九点平滑后的年降水量距平百分率, 粗实线为年降水量距平百分率的线性趋势)

Fig. 2 Interannual variations of annual rainfall anomaly percentages

(a) Whole China, (b) Northeast China, (c) North China, (d) The middle and lower reaches of the Yangtze River, (e) South China, (f) Tibetan Plateau, (g) Southwest China, and (h) Northwest China
(Thin solid indicates annual rainfall anomaly percentages, dotted the annual rainfall anomaly percentages after nine-point moving mean, thick solid the linear tendency of annual rainfall anomaly percentages)

少趋势,近 50 年分别下降 5%和 13%;南方(长江中下游、华南)年降水量呈增加趋势,近 50 年分别上升 2%和 4%。在我国西部,北方(西北)年降水量呈增加趋势,近 50 年上升 23%;南方的西南区域年降水量呈减少趋势,近 50 年下降 5%;青藏高原年降水量呈增加趋势,近 50 年上升 8%。其中,华北和西北地区年降水量变化趋势通过 $\alpha=0.1$ 的显著性水平检验(阈值为 0.231),年降水量变化趋势显著(参见表 1)。李聪等^[29]的研究也表明我国华北、西南地区年平均降水量为减少趋势,这与本文结果一致。

表 1 1960—2009 年年降水量距平百分率线性趋势(单位:%)

	Table 1 Linear tendency of annual rainfall anomaly percentages from 1960 to 2009 (unit:%)							
	全国	东北	华北	长江中下游	华南	青藏高原	西南	西北
50 年变化	0	-5	-13*	2	4	8	-5	23*

注: * 表示区域平均年降水量距平百分率线性趋势通过 $\alpha=0.1$ 的显著性水平检验(阈值为 0.231)

3 降水量序列的多时间尺度特征

为了研究降水量的年际和年代际时间尺度变化及其对年降水量变化的贡献,本文对年降水量距平百分率时间序列进行了小波分解并分析其模部平方值以得到降水量的年际和年代际振荡能量谱,并用小波变换后的方差分析不同时间尺度振荡对年降水量的贡献(图 3)。

由图 3a 可见,中国年降水量变化最显著的周期为 2~5 年,其中又以 2~3 年的年际变化最显著;其次是 22 年左右和 10 年左右周期的年代际变化,但年代际变化不如年际变化显著,我国年降水量以年际变化为主。我国降水量变化存在显著的准两年周期振荡已被不少研究^[30-32]所揭示,朱乾根等^[30]还指出准两年振荡的振幅存在 10~14 年左右的周期。由图 4a 和 4b 亦可以看到,近 50 年,我国年降水量年际(10 年以下)振荡能量经历了 4 次增强—减弱的变化,分别在 20 世纪 60 年代中期、70 年代初、80 年代后期、90 年代后期达到峰值,其中 1964—1965 年最强,其次是 1997—1998 年;而 20 世纪 60 年代末、70 年代后期、90 年代前期、21 世纪初后期达到谷值,其中在 1977—1979 年最弱,其次是 1992 和 2007 年;我国年降水量年代际(10~30 年)变化在 20 世纪 60 年代末到 70 年代中期最强,1973 年左右

达到峰值,随后逐渐下降,在 2005 年左右达到谷值,目前处于上升阶段。各区年降水量距平百分率时间序列小波分析结果不尽相同,具体情况如下。

东北地区,对年降水量贡献最大的周期性振荡是 20~30 年的年代际变化,其次是 10~15 年周期的年代际变化和 2~8 年周期的年际变化;年际变化在 20 世纪 90 年代以前较弱,之后逐渐加强,在 1998 年左右达到最强,21 世纪后又迅速减弱;年代际振荡在近 50 年里先减弱后加强,在 1983 年左右达到谷值,2008 年左右达到峰值,未来可能会减弱(图 3b、4c 和 4d)。东北地区年降水量的年代际变率有长周期变化,虽然能量有高、有低,但总体较强,所以年代际变化明显;同时,年降水量年际变化在 20 世纪 90 年代至 21 世纪初突然增强,导致这段时期降水量年际变化显著,出现年降水量历史上最多(1998 年)和最少(2001 年)(图 2b)。马柱国等^[28]的研究表明东北地区降水量呈现出周期大约 25~30 年的年代际振荡,未来还将处于一个少雨时段,与本文上述结论基本一致。

华北地区,对年降水量贡献最大的周期性振荡是 2~3 年左右的年际变化,其次是 8 年左右的年际变化和 20~25 年左右的年代际变化;年际变化对年降水量贡献在 20 世纪 60 年代中期最强(1965 年达到峰值),随后迅速减弱,虽然经历 3 次波动,在 20 世纪 70 年代初期、80 年代后期和 90 年代后期有所加强,但一直处于低值期;年代际变化的贡献在 20 世纪 70 年代初最强(1971 年左右达到峰值),随后减弱,20 世纪 80 年代末降至最低(1988 年左右出现谷值),之后开始缓慢加强,目前虽处于上升期,但仍较弱(图 3c、4e 和 4f)。张庆云^[12]指出华北降水量存在显著的年际和年代际变化,1949—1964 年华北降水量相对较丰沛,1965—1997 年华北降水量相对偏少,其中 1980—1993 年降水量持续偏少,干旱现象严重。徐桂玉等^[19]则指出华北降水量偏少的年份大部分出现在年代际降水量偏少的阶段,其中 20 世纪 80 年代是华北年代际、年际降水量同位相偏少,干旱较为严重的时段。由此可见,近年来华北少雨、干旱是降水量年际变率和年代际变率共同作用的结果。此外,总的来说,华北年降水量年代际振荡能量不如年际振荡能量强,年代际变化不如年际变化明显,特别是 20 世纪 60 年代中期年际变化最强,导致这个阶段降水量年际变化显著,出现历史最多(1964 年)和最少(1965 年)年降水量(图 2c)。匡正

等^[24]分析华北 8 个站的 1880—1996 年降水量资料得到 6~7、21~22 和 35~36 年的时间周期规律。张利平等^[33]则指出华北地区降水量存在明显的准 2 年振荡和准 19 年周期变化特征。可能由于所用资料和方法不同,这两个研究所获得的降水量变化周期有所差别,但本研究结果基本包含了这两个研究的降水量主要周期,即 2、8 和 20 年左右。由于资料长度(50 年)所限,本文未涉及 35 年左右的周期变化。

长江中下游地区,对年降水量贡献最大的周期性振荡是 8 年左右的年际变化,其次是 2~3 年左右的年际变化;年际变化在 20 世纪 70 年代末最强(峰值出现在 1978 年),之后波动性地减弱,80—90 年代相对较强,目前(2009 年左右)年际变化强度基本

达到最低值;年代际变化在最近 50 年里呈现一个长周期变化,即在 20 世纪 60 年代加强,70 年代初(1972 年左右)达到峰值,随后下降,在 90 年代前期(1993 年左右)达到谷值,然后又加强(图 3d、4g 和 4h)。总的来说,长江中下游地区年降水量的年代际振荡能量不如年际变化强,因此年降水量的年代际变化不如年际变化明显(图 2d)。

华南地区,对年降水量贡献最大的是 24 年左右的周期振荡,其次是 11 和 4 年左右的周期振荡;在近 50 年里,年际变化呈现阶段性增强、减弱,而年代际振荡的能量相对比较稳定。与之相应,年降水量的年代际变化比较明显(图 2e)。年代际振荡在 20 世纪 60 年代末至 70 年代初(1969 年左右)有一低

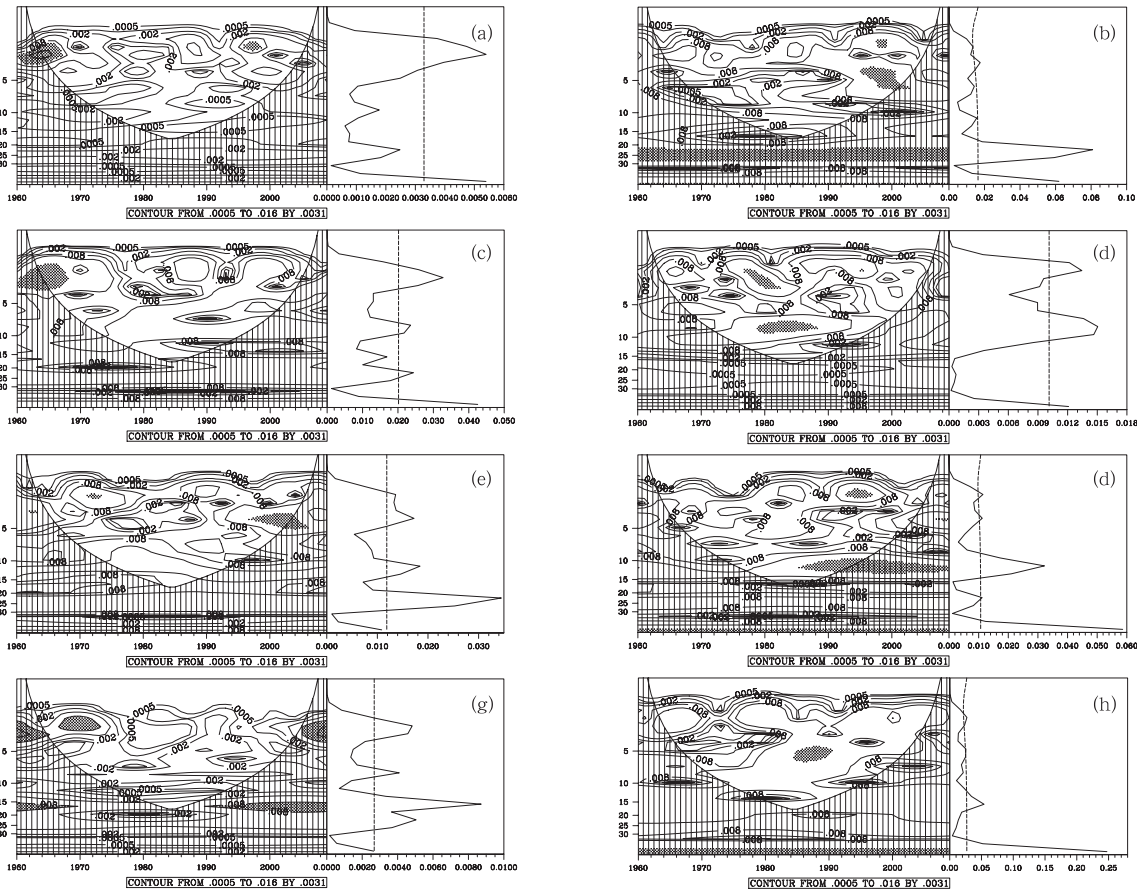


图 3 年降水量距平百分率小波变换功率谱及方差
(a)全国,(b)东北,(c)华北,(d)长江中下游,(e)华南,(f)青藏高原,(g)西南,(h)西北
(纵坐标为周期,单位是年;阴影表示通过 $\alpha=0.10$ 显著性水平检验的区域,
栅格线表示小波变换受边界影响的区域;方差图中的虚线表示红噪声检验)

Fig. 3 Wavelet power spectra and variances of annual rainfall anomaly percentages
(a) Whole China, (b) Northeast China, (c) North China, (d) the middle-lower reaches of the Yangtze River, (e) South China, (f) Tibet Plateau, (g) Southwest China, and (h) Northwest China
(The ordinate is the Fourier period (unit: a), shaded areas are statistically significant at 0.10 confidence level, grid regions indicate the cone of influence where edge effects become important. Dashed line denotes red-noise test)

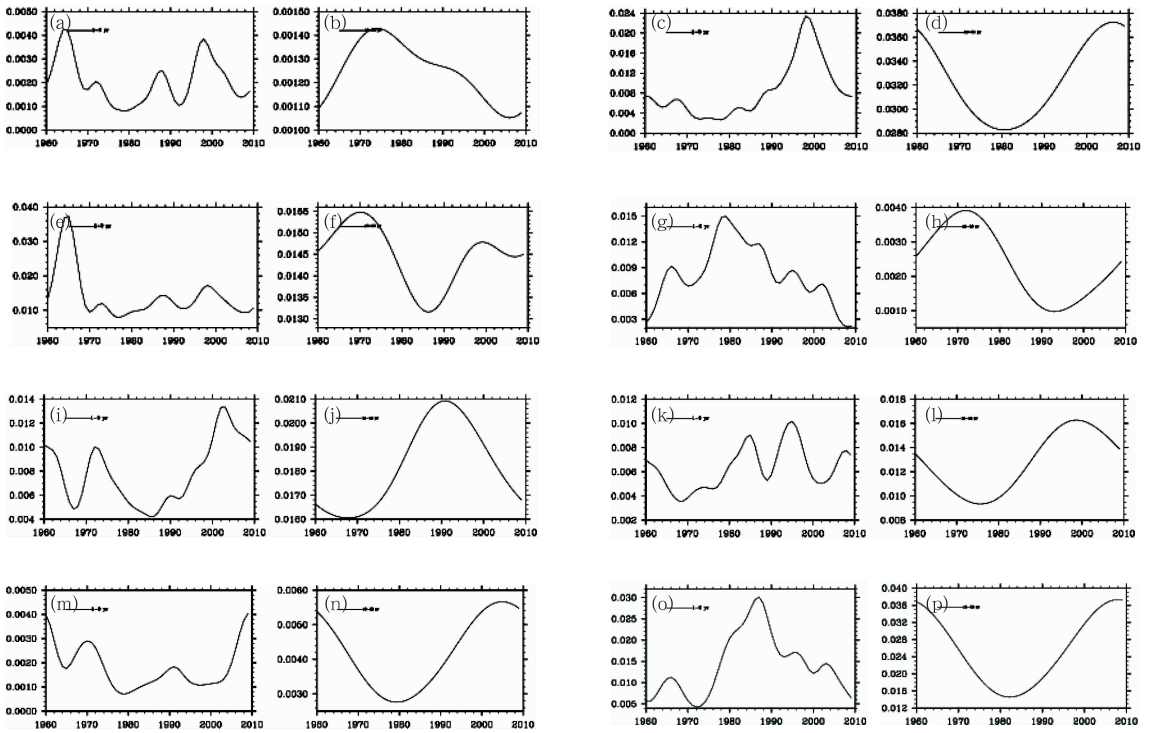


图 4 年降水量距平百分率小波分析的年际(左栏)和年代际(右栏)变化能量
(a~b)全国, (c~d)东北, (e~f)华北, (g~h)长江中下游, (i~j)华南,
(k~l)青藏高原, (m~n)西南, o~p(西北)

Fig. 4 Wavelet powers at the interannual (left panel) and interdecadal (right panel) scales of annual rainfall anomaly percentages over (a~b) Whole China, (c~d) Northeast China, (e~f) North China, (g~h) the middle-lower reaches of the Yangtze River, (i~j) South China, (k~l) Tibetan Plateau, (m~n) Southwest China, and (o~p) Northwest China

谷期,之后增强,在 80 年代末至 90 年代初(1990 年左右)达到峰值期,然后减弱,目前处于相对较弱的阶段。年际变化经历了由降到升、再由降到升的变化,2 个谷值分别出现在 60 年代末(1967 年左右)、80 年代前期(1983 年左右),2 个峰值分别出现 70 年代初(1972 年左右)、21 世纪初,60 年代初年际变化也已较强,此时年代际振荡正是比较弱的时期(图 3e、4i 和 4j)。相应地,年降水量的年际变化在 20 世纪 60 年代初、70 年代初,以及 21 世纪初都较强,而在 60 年代末和 80 年代前期较弱(图 2e)。

在高原地区,对年降水量贡献最大的是 10~15 年左右的周期振荡,其次是 25 和 2~5 年左右的周期振荡。年代际振荡在 20 世纪 70 年代中期达到谷值、在 90 年代末达到峰值,目前处于下降阶段;年际变化则经历了 3 个谷值:60 年代末(1968 年左右)、80 年代末(1989 年左右)、21 世纪初(2002 年左右),3 个峰值:80 年代中(1985 年左右)、90 年代中(1995 年左右)、21 世纪初末(2008 年左右)(图 3f、4k 和 4l)。但总的来说,年际和年代际振荡都不

太强,对年降水量的作用都不大,因此年降水量的年际以上周期变化都不显著(图 2f)。

西南地区,对年降水量贡献最大的是 16 年左右的周期振荡,其次是 22 年左右、2~4 年以及 8 年左右的周期振荡;20 世纪 80 年代之前年代际振荡处于减弱阶段,80 年代之后年代际振荡加强,21 世纪初达到最强;年代际振荡的谷值出现在 20 世纪 70 年代末(1979 年左右),峰值出现在 21 世纪初中期(2005 年左右);年际振荡在 20 世纪 60 年代至 70 年代中期较强,在 70 年代末至 21 世纪初处于低值期,2004 年以后迅速上升(图 3g、4m 和 4n)。但总的来说,年际和年代际振荡能量都不强,相应地,年降水量的年际以上周期变化都不是太显著(图 2g)。

西北地区,年际变化和年代际变化对年降水量的贡献都很大,贡献最大的是 15~20 年左右的周期的年代际振荡,90 年代以后,年代际振荡对年降水量的贡献逐渐超过年际变化;年际变化在 20 世纪 60—70 年代较 80—90 年代以及 21 世纪初偏弱,其中又以 20 世纪 70 年代末至 80 年末最强,对年降水

量的贡献最大(图 3h、4o 和 4p),因此这一阶段年降水量的年际变化非常显著;年代际振荡的谷值出现在 20 世纪 80 年代初(1982 年左右),峰值出现在 21 世纪初期末(2008 年左右)(图 2h)。类似地,李栋梁等^[14]的研究也发现,20 世纪 80 年代末以来,中国西北地区降水量处于年代际降水量变化的相对偏多期。

由图 4 可见,中国各区年降水量的年际和年代际振荡有较大差异。比较各区平均年降水量距平百分率的年际变化,华北、西北、东北地区年降水量年际变化较强、振幅较大,西南地区年降水量年际变化最弱,青藏高原、长江中下游、华南年降水量年际变化强度居中。总体来说,我国北方(东北、西北和华北地区)年降水量年际变化较强,年际变化对降水量的贡献较大;南方(西南、青藏高原、长江中下游和华南地区)年降水量年际振荡能量相对较小,年际变化对降水量的贡献较小。本文对我国 541 个站 1960—2009 年降水量资料的小波分析结果表明,我国大部分地区年降水量都存在显著的准两年周期振荡,尤其在华北和长江中下游地区,这一结果与前人^[30-31]的研究结果基本一致。但本文的结果表明,2~3 年的年际变化对两个地区的主要影响时间不同,华北地区在 20 世纪 60 年代影响最大,而长江中下游地区则主要影响 70 年代末和 80 年代的降水量。

王绍武等^[27,34-35]曾指出我国东部地区以 20~30 年的年代际变化为主,而西部则变化周期较长;中国西部 17—20 世纪,每一个世纪后半期的降水量均明显高于前半个世纪,因此被称为“世纪周期”;近 50 年中国西部有降水量增加的趋势,可能属于“世纪周期”性变化。本研究发现,我国各区年降水量的年代际变化根据振荡能量亦可分为强、中、弱三类。其中,东北和西北地区年降水量的年代际变化较强,年代际变化明显且同位相;华北、华南和青藏高原年降水量年代际振荡强度居中;西南和长江中下游地区年降水量年代际振荡较弱,二者成反位相变化。此外,西南与青藏高原地区年降水量的年代际振荡同位相,长江中下游与青藏高原年降水量的年代际振荡反位相;华北与青藏高原年降水量的年代际振荡的关系在 20 世纪 80 年代末发生了变化,80 年代末以前反位相,之后同位相。

此外,由图 4 可见,我国东北、西北、华南、青藏高原和西南地区年降水量的年代际变率对年降水量的贡献目前处于下降阶段,未来 5~10 年可能继续下降;长江中下游地区年降水量的年代际变率对年降水量的贡献目前处于上升阶段,未来 5~10 年可

能继续上升;全国年降水量的年代际变率对年降水量的贡献目前处于由低向高的转变阶段,未来 10~30 年可能会继续上升。但是,全国平均年降水量的年际和年代际振荡能量均较弱,这可能是由于各地区年降水量的年际和年代际变化相互抵消所导致的。

4 结 论

本文利用 1960—2009 年中国台站降水量资料,采用线性趋势分析、九点平滑滤波和小波分析等方法,对全国、区域年降水量时间序列进行细致的研究,揭示了年降水量变化的多时间尺度的复杂结构,并根据年代际周期对未来降水量变化进行了预估,得到以下主要结论:

(1)近 50 年,全国平均年降水量距平百分率变化趋势不明显;各区年降水量变化趋势差异较大。总体来说,在我国东部,北方(东北和华北)年降水量呈减少趋势,南方(长江中下游和华南)年降水量呈增加趋势;在我国西部,西北和青藏高原的年降水量呈增加趋势,西南的年降水量呈减少趋势。其中,华北和西北地区年降水量变化趋势显著(通过 $\alpha=0.1$ 的显著性水平检验),近 50 年分别下降了 13% 和上升了 23%。

(2)在这 50 年里,我国年降水量经历 2 次少雨期(20 世纪 60 年代至 80 年代和 21 世纪初)、1 次多雨期(20 世纪 90 年代),目前处于年降水量偏少阶段。其中,东北、华北、华南、西南和长江中下游地区目前都处于年降水量偏少阶段;高原和西北地区目前处于年降水量偏多阶段。

(3)我国年降水量的年际和年代际变化有较大的地区性差异。我国北方(东北、西北和华北地区)年降水量年际变化较强,年际变化对年降水量的贡献较大;南方(西南、青藏高原、长江中下游和华南地区)年降水量年际变化相对较弱,年际变化对降水量的贡献较小。东北和西北地区年降水量的年代际振荡较强,年代际变化明显且同位相;华北、华南和青藏高原年降水量年代际振荡强度居中;西南和长江中下游地区年降水量年代际振荡较弱。华北与青藏高原年降水量的年代际振荡的关系在 20 世纪 80 年代末发生了变化,80 年代末以前反位相,之后同位相。

(4)全国平均年降水量的年际和年代际振荡能量均较弱,年代际变化不如年际变化明显,2~3 年周期的年际变化对我国年降水量贡献最大,主要影响时间是 20 世纪 60 年代和 90 年代后期。对东北、

华南、西南和青藏高原地区年降水量贡献最大的分别是 20~30 年、24 年左右、16 年左右和 10~15 年周期的年代际振荡;对华北和长江中下游地区年降水量贡献最大的分别是 2~3 年和 8 年左右周期的年际振荡。西北地区年降水量的年际和年代际振荡对年降水量的贡献都很大,贡献最大的是 15~20 年周期的年代际振荡,20 世纪 90 年代以后,年代际振荡对年降水量的贡献逐渐超过年际振荡。

(5)从年降水量的年代际变化来看,我国东北、西北、华南、高原和西南地区年降水量的年代际变率对年降水量的贡献目前处于下降阶段,未来 5~10 年可能继续下降;长江中下游地区年降水量的年代际变率对年降水量的贡献目前处于上升阶段,未来 5~10 年可能继续上升;全国年降水量的年代际变率对年降水量的贡献目前处于由低向高的转变阶段,未来 10~30 年可能会继续上升。

参考文献

- [1] Zhang Y, Wallace J M, Battisti D S. ENSO-like interdecadal variability: 1900—1931[J]. J Climate, 1997, 10(5):1004-1020.
- [2] Mantua N J, Hare S R, Zhang Y. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production[J]. Bull Amer Meteor Soc, 1997, 78(6):1069-1079.
- [3] Scott P A, Tett S F B. Scale-dependence detection of climate change[J]. J Climate, 1998, 11(12):3283-3294.
- [4] Webster P J, Yang S. Monsoon and ENSO: Selectively interactive system[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 1992, 118(507):877-926.
- [5] Ju J, Slingo J. The Asian summer monsoon and ENSO[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 1995, 121(525):1133-1168.
- [6] Hu Z. Interdecadal variability of summer climate over East Asia and its association with 500hPa height and global sea surface temperature[J]. J Geophys Res, 1997, 102, D16, 19403-19412.
- [7] 于群,姜燕. 全球夏季加热场的年际、年代际变化[J]. 气象, 2008, 34(T1):255-261.
- [8] 薛峰,王会军,何金海. 马斯克林高压和澳大利亚高压的年际变化及其对东亚夏季降水的影响[J]. 科学通报, 2003, 48(3):287-291.
- [9] 朱伟军,李莹. 冬季北太平洋风暴轴的年代际变化特征及其可能影响机制[J]. 气象学报, 2010, 68(4):477-486.
- [10] 唐民,吕俊梅. 东亚夏季降水年代际变异模式及其与太平洋年代际振荡的关系[J]. 气象, 2007, 33(10):89-95.
- [11] 陈兴芳,孙林海. 我国年、季降水的年代际变化分析[J]. 气象, 2000, 28(7):1-9.
- [12] 张庆云,陶诗言,张顺利. 夏季长江流域暴雨洪涝灾害的天气气候条件[J]. 大气科学, 2003, 27(6):1018-1030.
- [13] 陈烈庭. 华北各区夏季降水年际和年代际变化的地域性特征[J]. 高原气象, 1999, 18(4):477-485.
- [14] 李栋梁,魏丽,蔡英,等. 中国西北现代气候变化事实与未来趋势展望[J]. 冰川冻土, 2003, 25(2):135-142.
- [15] 藏海佳,周自江. 青藏高原区域性积雪增量序列及其变化特征[J]. 气象, 2009, 35(6):78-81.
- [16] 申乐琳,何金海,周秀骥,等. 近 50 年来中国夏季降水及水汽输送特征研究[J]. 气象学报, 2010, 68(6):918-928.
- [17] 黄荣辉,徐予红,周连童. 我国夏季降水的年代际变化及华北干旱化趋势[J]. 高原气象, 1999, 18(4):465-476.
- [18] 吕俊梅,琚建华,江剑民. 近一百年中国东部区域降水的年代际跃变[J]. 大气科学, 2009, 5(3):524-536.
- [19] 徐桂玉,杨修群,孙旭光. 华北降水年代际、年际变化特征与北半球大气环流的联系[J]. 地球物理学报, 2005, 48(3):511-518.
- [20] Zhao Z, Li Q, Zhang Z, et al. Relationships between ENSO and climate change in China and predictions of ENSO[J]. World Resource Review, 2000, 12(2):269-279.
- [21] Christopher T, Gilbert P C. A Practical Guide to Wavelet Analysis[J]. Bull Amer Meteor Soc, 1998, 79(1):61-65.
- [22] Nener B D, Ridsdill-Smith T A, Zeisse C. Wavelet analysis of low altitude infrared transmission in the coastal environment[J]. Infrared Physics & Technology, 1999, 40(5):399-409.
- [23] 邓自旺,尤卫红,林振山. 小波变换在全球气候多时间尺度变换分析中的应用[J]. 南京气象学院学报, 1997, 20(4):505-510.
- [24] 匡正,季仲贞,林一晔. 华北降水时间序列资料的小波分析[J]. 气候与环境研究, 2000, 5(3):312-317.
- [25] Meehl G A, Goddard L, Murphy J, et al. Decadal prediction. Can it be skillful? [J]. Bull Amer Meteor Soc, 90(10):1467-1485.
- [26] 王遵娅,丁一汇. 近 50 年来中国气候变化特征的再分析[J]. 气象学报, 2004, 4(2):229-236.
- [27] 王绍武,蔡静宁,朱锦红,等. 19 世纪 80 年代到 20 世纪 90 年代中国年降水量的年代际变化[J]. 气象学报, 2002, 60(5):637-639.
- [28] 马柱国,任小波. 1951—2006 年中国区域干旱化特征[J]. 气候变化研究进展, 2007, 3(4):195-201.
- [29] 李聪,肖子牛,张晓玲. 近 60 年中国不同区域降水的气候变化特征[J]. 气象, 2010, 38(4):419-424.
- [30] 朱乾根,智协飞. 中国降水准两年周期变化[J]. 南京气象学院学报, 1991, 14(3):261-268.
- [31] Zhu Qiangen, Zhi Xiefei. Quasi-biennial oscillation in rainfall over China[J]. Acta Meteor Sin, 1991, 5(4):426-434.
- [32] 黄荣辉,陈际龙,黄刚,等. 中国东部夏季降水的准两年周期振荡及其成因[J]. 大气科学, 2006, 30(4):546-560.
- [33] 张利平,夏军,胡志芳. 华北地区降水多时间尺度演变特征[J]. 气候变化研究进展, 2008, 4(3):140-144.
- [34] 王绍武,蔡静宁,慕巧珍,等. 中国西部年降水量的气候变化[J]. 自然资源学报, 2002, 17(4):415-422.
- [35] 王绍武,龚道溢,翟盘茂,等. 气候变化[M]. //秦大河总主编. 中国西部环境演变评估. 王绍武,董光荣主编. 中国西部环境特征及其演变. 北京:科学出版社, 2002:29-70.